

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

член-корреспондента РАН, доктора технических наук

Баннх Игоря Олеговича

**на диссертационную работу Дуюновой Виктории Александровны
«Научно-технологические основы разработки высокопрочных
жаропрочных литейных магниевых сплавов нового поколения с
повышенной пожарной безопасностью», представленную на соискание
ученой степени доктора технических наук по научной специальности
2.6.1. – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов**

Актуальность темы

Магниеые сплавы относятся к классу конструкционных материалов, сочетающих низкую плотность и достаточно высокий уровень характеристик прочности и жесткости. Их применение в изделиях позволяет существенно снизить массу деталей и конструкций по сравнению с традиционными алюминиевыми материалами. Серийно применяющимися литейными магниевыми сплавами являются сплавы МЛ5, МЛ10, МЛ19, которые внедрены в изделия двигателестроительной, авиационной, ракетостроительной отраслей промышленности. Разработка новых образцов техники сопровождается повышением тактико-технических характеристик, что, в свою очередь, предполагает применение материалов с более высоким заданным уровнем свойств. К этому также можно отнести безопасность эксплуатации, что в случае с магниевыми сплавами ограничено их склонностью к воспламенению из-за природы самого магния. Очевидно, что серийные, разработанные еще в советское время, магниевые сплавы не в полной мере способны обеспечивать современные требования. Из-за разделения систем легирования одни из них обеспечивают высокие для магниевых сплавов прочностные свойства, другие – жаропрочные. Сплавы же, обладающие одновременно высоким комплексом указанных характеристик, отсутствуют. В связи с этим разработка магниевых сплавов, обладающих одновременно высокой прочностью и жаропрочностью,

и повышенной пожарной безопасностью, представляет собой актуальную научно-техническую задачу.

Особый интерес представляет выбранный автором подход, основанный на комплексном легировании магниевых сплавов редкоземельными элементами. Установление взаимосвязей между химическим составом, структурно-фазовым состоянием и эксплуатационными характеристиками многокомпонентных сплавов системы Mg-PЗЭ-Zr позволяет перейти от эмпирического выбора составов к научно обоснованному формированию заданного комплекса свойств.

Важным достоинством выбранного направления является его практическая значимость. Работа охватывает не только вопросы формирования структуры и свойств сплавов, но и разработку режимов выплавки, литья и термической обработки, методов оценки пожаробезопасности и промышленное опробование. Для разработанных сплавов ВМЛ25 и ВМЛ26 получены патенты, выпущены паспорта на материалы, технические условия, технологические инструкции и рекомендации, а также методические материалы по проведению огневых испытаний.

Таким образом, тема диссертационной работы В.А. Дуюновой является **актуальной** и своевременной как в научном, так и в практическом отношении. Решение поставленной задачи способствует развитию научных основ разработки высокопрочных жаропрочных литейных магниевых сплавов и расширению возможности их применения.

Структура и содержание диссертационной работы

Диссертационная работа В.А. Дуюновой состоит из введения, шести глав, основных выводов, списка использованных источников и приложений. Работа изложена на 319 страницах, содержит 107 рисунков и 79 таблиц, библиографический список включает 242 наименования.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, приведены сведения о достоверности и апробации результатов, публикациях автора и структуре диссертации.

В первой главе проведен анализ современного состояния литейных магниевых сплавов и требований, предъявляемых к материалам нового поколения. Рассмотрены традиционные, жаропрочные и пожаробезопасные литейные магниевые сплавы, влияние фазового состава и структурного состояния на их свойства. Значительное внимание уделено роли редкоземельных элементов (РЗЭ), процессам распада пересыщенного твердого раствора и взаимосвязи структуры с огневыми характеристиками магниевых сплавов. Проанализированы также основные проблемы их промышленного внедрения.

Во второй главе представлены объекты и методы исследования. Описаны исследуемые материалы, методики моделирования фазовых превращений, дифференциальной сканирующей калориметрии, растровой и просвечивающей электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа. Приведены методики механических, коррозионных и огневых испытаний.

В третьей главе проведен экспериментальный выбор системы легирования высокопрочного пожаробезопасного магниевого сплава. На первом этапе исследованы пять композиций системы Mg-РЗЭ-Zr с различным содержанием Gd, Nd, Y, Ce, Zn, Sc, Al и Cd. Показано, что увеличение содержания РЗЭ не приводит к ожидаемому повышению свойств вследствие роста объемной доли интерметаллидных фаз и формирования их выделений по границам зерен. Уточнены составы экспериментальных композиций и исследовано влияние термической обработки. Методом ДСК определены

температурные интервалы растворения фаз и выбраны режимы закалки и старения. Исследовано раздельное влияние основных легирующих элементов. На основании этих результатов выполнен полный факторный эксперимент для системы Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr и разработаны математические модели прогнозирования временного сопротивления, предела текучести и кратковременной прочности при 250 и 300 °С в зависимости от содержания Y, Nd, Gd и Zn.

В четвертой главе выполнено углубленное исследование выбранного опытного состава, получившего обозначение ВМЛ_оп, и разработаны режимы его термической обработки. Расчетное моделирование фазовых превращений сопоставлено с результатами ДСК, рентгеноструктурного анализа и электронной микроскопии. Детальными исследованиями установлено формирование в процессе старения комплекса метастабильных фаз β_T , β' и β_1 , а также γ' , γ'' и LPSO-структур. Показано, что первой из твердого раствора выделяется β_T -фаза, а последующее обогащение РЗЭ сопровождается образованием β_1 -фазы. Обнаружены интерметаллиды Zr_3Zn_2 и Zr_2Zn , выполняющие роль центров гетерогенного зарождения β_1 фазы. Для β_1 фазы установлены ориентационные соотношения с матрицей α -Mg и показано изменение ориентации частиц в процессе их роста. Исследование пережога показало, что нагрев под закалку до 540-560 °С с длительной выдержкой приводит к формированию грубых фаз $Mg_3(Zn, \text{РЗЭ})$ по границам зерен и необратимому ухудшению механических характеристик. Показано, что минимальная температура начала устойчивого горения ВМЛ_оп составила не менее 805 °С, а в большинстве экспериментов образцы нагревались до 844-960 °С без перехода к интенсивному устойчивому горению. Исследование поверхностного слоя после огневого воздействия показало его обогащение иттрием и другими РЗЭ; содержание иттрия в отдельных участках достигало 55-58 масс. %, что связывается с формированием защитного оксидного слоя. Исследованному сплаву присвоена марка ВМЛ26. Отдельно исследована

стабильность ВМЛ26 при эксплуатационных нагревах 150, 250 и 350 °С продолжительностью до 1000 ч, по результатам которых установлены температурные условия эксплуатации.

В пятой главе осуществлен переход от лабораторной разработки ВМЛ26 к промышленной технологии его получения. Исследованы параметры выплавки в индукционных печах с применением защитной газовой среды, разработана технология фильтрации расплава, направленная на снижение содержания неметаллических включений и повышение качества отливок. Приведены результаты разработки составов порошков и ремонтной технологии исправления литейных дефектов методом газодинамического напыления.

В шестой главе сформулированная концепция комплексного легирования распространена на систему $\text{Mg}-(\text{Nd}+\text{Gd}+\text{Y}+\text{Er}+\text{Dy})-\text{Zr}$. Проведен выбор составов с использованием тяжелых редкоземельных элементов, исследовано их влияние на структуру и механические характеристики. Отдельно изучено влияние кадмия на жаропрочный литейный магниевый сплав, легированный РЗЭ. По результатам комплекса исследований проведен сравнительный анализ разработанных высокопрочного пожаробезопасного литейного магниевого сплава ВМЛ26 и жаропрочного сплава ВМЛ25 с серийными сплавами МЛ9, МЛ10 и МЛ19, которые показали, что разработанные сплавы превосходят указанные серийные сплавы-аналоги по комплексу эксплуатационных характеристик.

В заключительной части работы сформулированы основные выводы, обобщающие результаты проведенных исследований, и представлена разработанная нормативная документация. Полученные результаты последовательно отражают решение поставленных в работе задач – от научного обоснования принципов легирования и установления

закономерностей формирования структуры до создания конкретных составов, разработки технологических процессов и их промышленного опробования.

Научная новизна и практическая значимость работы

В диссертации В.А. Дуюновой представлены результаты, обладающие научной новизной и имеющие практическую значимость:

- Сформулирована и экспериментально обоснована концепция комплексного легирования литейных магниевых сплавов системы Mg-PЗЭ-Zr, основанная на совместном введении редкоземельных элементов цериевой и иттриевой подгрупп. Установлено влияние Y, Gd, Nd и Zn на прочностные и жаропрочные характеристики сплавов.
- Установлены закономерности распада пересыщенного твердого раствора и формирования упрочняющих фаз в многокомпонентном сплаве системы Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr. Показано последовательное образование метастабильных β_T , β' и β_1 фаз, а также γ' , γ'' и LPSO-структур. Установлено, что на начальной стадии распада формируется β_T -фаза, дальнейшее обогащение которой редкоземельными элементами сопровождается образованием β_1 фазы.
- Экспериментально установлены особенности ориентационных соотношений β_1 -фазы с матрицей α -Mg. Для начальной стадии формирования β_1 -фазы определено ориентационное соотношение $\{001\}\beta_1//\{110\}\alpha$ и $\langle 110\rangle\beta_1//\langle 001\rangle\alpha$. Показано, что при росте частиц и изменении параметра их кристаллической решетки происходит разворот β_1 фазы приблизительно на $\pm 5^\circ$ с формированием шести эквивалентных ориентаций относительно α -Mg.
- Выявлены особенности образования Zr-Zn-содержащих интерметаллидов. Наряду с фазой Zr_3Zn_2 обнаружены стержневидные выделения Zr_2Zn с тетрагональной кристаллической решеткой ($a = 0,70$ нм, $c = 0,55$ нм). Установлена роль интерметаллидов Zr_3Zn_2 и Zr_2Zn как центров гетерогенного зарождения β_1 фазы.

- Установлена взаимосвязь структурно-фазового состояния магниевых сплавов с его устойчивостью к воспламенению. Показано, что при огневом воздействии происходит перераспределение иттрия и других РЗЭ в направлении поверхности с образованием обогащенного ими окисленного слоя.
- Разработаны математические модели прогнозирования механических характеристик сплавов системы Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr, позволяющие определять временное сопротивление, предел текучести и кратковременную прочность при 250 и 300 °С в зависимости от содержания основных легирующих элементов. Полученные зависимости использованы для научно обоснованного выбора химического состава сплавов.
- На основании установленных закономерностей разработаны новые литейные магниевые сплавы ВМЛ25 и ВМЛ26, сочетающие повышенные прочностные и жаропрочные характеристики с высокой устойчивостью к воспламенению, проведено их промышленное опробование. Для разработанных материалов проведена общая квалификация (паспортизация) и выпущены паспорта на материалы, технические условия, технологические инструкции и рекомендации по их изготовлению и обработке.

Вопросы и замечания

При общей положительной оценке диссертационной работы В.А. Дуюновой по ее содержанию имеются отдельные замечания и вопросы дискуссионного характера:

1. В работе предложена последовательность фазовых превращений при распаде пересыщенного твердого раствора с формированием β_T , β' и β_1 фаз. Отдельные промежуточные стадии превращений экспериментально фиксируются значительно реже других. В связи с этим требует дополнительного пояснения, насколько однозначно установленная последовательность фазообразования реализуется во всем исследованном

температурно-временном интервале старения и возможно ли параллельное протекание отдельных стадий распада?

2. При исследовании β_1 -фазы автором установлено новое ориентационное соотношение с α -Mg и предложено объяснение перехода от исходной ориентации к другой путем разворота частиц приблизительно на $\pm 5^\circ$, связанного с ростом β_1 -фазы и изменением параметра ее решетки. Получено ли прямое экспериментальное подтверждение именно механизма такого разворота в процессе роста одной и той же частицы или данный механизм предложен на основании сопоставления частиц, находящихся на различных стадиях формирования?

3. Одним из важных результатов работы является обнаружение стержневидных выделений, отнесенных автором к соединению Zr_2Zn . В диссертации прямо отмечается необходимость дальнейшего уточнения пространственной группы и стехиометрии данного соединения. Поэтому представляется несколько преждевременным однозначное обозначение обнаруженной фазы как Zr_2Zn . Корректнее было бы до проведения дополнительного структурного анализа рассматривать ее как Zr-Zn-содержащее соединение предполагаемого состава Zr_2Zn .

4. В работе убедительно показана высокая устойчивость ВМЛ26 к воспламенению и установлено обогащение поверхностного оксидного слоя иттрием и другими редкоземельными элементами. В отдельных участках содержание иттрия достигает 55-58 масс. %. Однако для более полного обоснования предложенного механизма пожаробезопасности было бы целесообразно привести более детальную идентификацию фазового состава непосредственно защитного оксидного слоя и количественно оценить вклад отдельных оксидов РЗЭ в повышение его защитных свойств.

5. В пятой главе значительное внимание уделено разработке технологии промышленного получения сплава ВМЛ26, в том числе выбору защитной газовой среды, фильтрации расплава и снижению его загрязненности неметаллическими включениями. В работе основное внимание при оценке

эффективности разработанной технологии уделено структуре и механическим характеристикам получаемого материала. Насколько чувствительны температура воспламенения и другие показатели пожаробезопасности ВМЛ26 к технологическим отклонениям – изменению фактического содержания РЗЭ вследствие угара, наличию неметаллических включений и литейных дефектов? Иными словами, какой из технологических факторов является наиболее критичным именно с точки зрения сохранения пожаробезопасности сплава в условиях промышленного производства?

Заключение

По актуальности, степени обоснованности научных положений, объему исследований и научно-практической значимости результатов и выводов представленная на соискание ученой степени доктора технических наук диссертационная работа Дуюновой Виктории Александровны «Научно-технологические основы разработки высокопрочных жаропрочных литейных магниевых сплавов нового поколения с повышенной пожарной безопасностью» соответствует требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор – Дуюнова Виктория Александровна – заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по научной специальности 2.6.1. – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Основные положения и выводы диссертации достаточно обоснованы и подтверждены значительным объемом экспериментальных исследований с применением современных методов структурного и фазового анализа, механических, коррозионных и огневых испытаний. Основные результаты работы опубликованы в научных изданиях и защищены патентами Российской Федерации.

Высказанные в отзыве замечания и вопросы имеют преимущественно уточняющий и дискуссионный характер, не затрагивают основных научных

положений диссертации и не снижают научной и практической значимости выполненной работы.

Официальный оппонент
член-корреспондент РАН,
доктор технических наук
01.10.2026

И.О. Банных

Баных Игорь Олегович
член-корреспондент РАН, доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией конструкционных
сталей и сплавов имени академика Н.Т. Гудцова
Федерального государственного бюджетного учреждения науки института
металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук
(ИМЕТ РАН)

Адрес: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, 49

Телефон: +7 (499) 135-20-60

Адрес электронной почты: imet@imet.ac.ru

Подпись Баных И.О. заверяю,
Заместитель директора ИМЕТ РАН
по научной работе к.т.н.



Самохин А.В.